Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 18, No. 4, Oct- Nov. 2022, p. 453- 466

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۸، شماره ۴، مهر - آبان ۱۴۰۱ ص.۴۶۶-۴۵۳

Homepage: http://ifstrj.um.ac.ir
Full Research Paper

Investigation of physical and mechanical properties of biodegradable opopanax gum film containing resin and nanoparticles of opopanax

Narges Akafian[1], Hajar Shekarchizadeh[2*]

Received: 2021.09.01
Revised: 2021.11.12
Accepted: 2021.11.16
Available Online: 2023.01.04

How to cite this article:
Akafian, N., Shekarchizadeh, H. (2022). Investigation of physical and mechanical properties of biodegradable opopanax gum film containing resin and nanoparticles of opopanax. *Iranian Food Science and Technology Research Journal*. *18* (4), 453-466.

Abstract

Introduction: In the last decade, nanotechnology approaches have been used to improve the functional properties of packaging materials. The main focus is on creating new packaging materials that extend the shelf life of food, which in turn improves food safety performance. The use of nanostructures can also improve the mechanical properties of the packaging. Many traditional packages are made from non-degradable materials that double the environmental pollution in addition to using fossil fuels to produce them. Resin is a natural or synthetic compound that is very viscous and hardens under certain conditions. It is usually soluble in alcohol r. Natural resin is obtained from plants. This material is very sticky but hardens over time. Due to environmental concerns and the possibility of depletion of oil reserves, the construction of composites based on natural resins from renewable sources has become important. In previous studies, Javashir gum has been used to prepare an edible film with high water vapor permeability and solubility, as well as poor physical properties. Since Javashir gum is a natural, native and inexpensive gum, so in this research, the improvement of the properties of the film prepared from Javoshir gum is considered using.a combination of nanoparticles and resin obtained from Javoshir gum

Materials and methods: Javshir nanoparticles were sprayed on Javashir film (4% gum and 2.5% glycerol) at two different times of 30 and 60 minutes. In order to increase the hydrophobicity of the films, Javashir resin was covered as a layer on the surface of the films. Then different physical and mechanical properties of the film such as thickness, water solubility, and water vapor permeability, elongation at break, tensile strength, contact angle and morphology were determined.

Results and discussion: The results of thickness measurement showed that adding large amounts of nanoparticles as well as coating the film surface with resin increased the film thickness. Solubility results showed that all films have a very high solubility due to the hydrophilic nature of Javashir. However, the addition of nanoparticles and coating with resin reduced the water solubility of the film. The water vapor permeability of nano-60 film was increased compared to the control film which can be attributed to the increase in film surface due to the addition of nanoparticles. However, coating the surface with resin significantly reduced the water vapor permeability of the film. The tissue test showed that nano-30 resin film had 6.54 ± 2.72% elongation to tear point and 302.9 ± 47.1% tensile strength. Nano 30 resin film had the highest tensile strength and the lowest tensile percentage. The results of the contact angle showed that the lowest contact angle, which indicates high hydrophilicity, was related to the control sample, and the contact angle increased by

1. M. Sc., Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156–83111, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Food Science and Technology, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, 84156–83111, Iran.
(*Corresponding Author Email: shekarchizadeh@iut.ac.ir)
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2021.72273.1089

adding nanoparticles and coating with resin, resulting in increased hydrophobicity. SEM images also showed that the addition of nanoparticles and resin coating reduced the film roughness.

Finally, it can be said that the addition of Javoshir nanoparticles could well increase the tensile strength of Javashir film, and coating the surface of the film with resin was very effective in reducing the hydrophilicity and water vapor permeability of Javashir film.

Keyword: Gum, resin, Javashir, edib film, nanoparticles.

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد ۱۸، شماره ۴، مهر- آبان ۱۴۰۱ ص.۴۶۶-۴۵۳

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 18, No. 4, Oct- Nov. 2022, p. 453- 466

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی فیلم زیست تخریب‌پذیر جاوشیر حاوی رزین و نانوذرات جاوشیر

نرگس عکافیان[۱]- هاجر شکرچی‌زاده[۲]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۸/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵

چکیده

به‌منظور بهبود خواص فیلم تهیه شده از جاوشیر از نانو ذرات صمغ جاوشیر و همچنین رزین جاوشیر استفاده شد. نانوذرات روی فیلم جاوشیر (۴ درصد صمغ و ۲/۵ درصد گلیسرول) طی زمان‌های ۳۰ و ۶۰ دقیقه پاشش شدند. به‌منظور افزایش آبگریزی فیلم‌ها از رزین جاوشیر استفاده شد که به صورت یک لایه روی سطح فیلم‌ها پوشش داده شد. ضخامت فیلم‌ها پس از خشک شدن افزایش یافت که می‌تواند به دلیل فشار بخار آب به هنگام خروج از فیلم در زمان تبخیر شدن باشد. نتایج حلالیت نشان داد که کلیه فیلم‌ها حلالیت بسیار بالایی دارند که به دلیل ماهیت آبدوست جاوشیر است. البته افزودن نانوذرات و پوشش‌دهی با رزین سبب کاهش حلالیت در آب فیلم‌ها شد. نفوذپذیری به بخار آب فیلم نانو۶۰ نسبت به فیلم شاهد افزایش یافته بود که می‌توان آن را به افزایش سطح فیلم‌ها در اثر افزودن نانوذرات نسبت داد. این در حالی است که پوشش‌دهی سطح با رزین به‌طور معنی‌داری نفوذپذیری به بخار آب فیلم را کاهش داد. آزمون بافت‌سنجی نشان داد که فیلم نانو۳۰+ رزین دارای ۲/۷۲ ±۶/۵۴ درصد کشیدگی تا نقطه پارگی و۴۷/۱ ± ۳۰۲/۹ استحکام کششی بود. فیلم نانو ۳۰+ رزین بیشترین استحکام کششی و کمترین درصد کشیدگی را داشت. نتایج زاویه تماس نشان داد که با افزودن نانوذرات و پوشش‌دهی با رزین زاویه تماس و در نتیجه آبگریزی افزایش یافته است. تصاویر SEM نیز نشان داد که افزودن نانوذرات و پوشش‌دهی با رزین سبب کاهش زبری فیلم شده است. در نهایت می‌توان گفت که افزودن نانوذرات جاوشیر به خوبی توانست استحکام کششی فیلم جاوشیر را افزایش دهد و پوشش‌دهی سطح فیلم با رزین برای کاهش ویژگی‌های آب دوستی و نفوذپذیری به بخار آب فیلم جاوشیر بسیار موثر بود.

واژه‌های کلیدی: صمغ، رزین، جاوشیر، فیلم خوراکی، نانوذرات.

مقدمه

نانوتکنولوژی دستکاری یا خودآرایی تک تک اتم‌ها، مولکول‌ها یا خوشه‌های مولکولی و یا ساختارهایی است که می‌توانند مواد و دستگاه هایی را با خصوصیات جدید به وجود آورند. تجمعی از واحدهای سازنده (اتم و یا مولکول) با اندازه‌ای بین ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر را نانوذرات می گویند. به‌طور کلی با تغییر اندازه نانوذرات در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ نانومتر، نسبت سطح به حجم و فاصله ترازهای انرژی تغییر می‌کند. این دو متغیر عامل بسیاری از تغییر خواص و ویژگی‌ها می‌باشند. فناوری نانو در عرصه‌هایی همچون تحویل مواد مغذی به درون بدن توسط حامل های نانو مقیاس، بسته‌بندی موادغذایی و نیز در تجزیه و تحلیل مواد غذایی با استفاده از نانوحسگرها وارد شده است (Khezri, 2018، Kubik et al., 2005).

استفاده از فناوری نانو در محصولات غذایی را می‌توان به دو دسته کلی کاربرد مستقیم و کاربرد غیرمستقیم تقسیم‌بندی نمود (Kadivar and Soltanizadeh, 2013). استفاده مستقیم به تجمع نانومواد در محصولات غذایی اشاره دارد. در حالیکه کاربردهای غیرمسقیم شامل به‌کارگیری نانومواد در بسته‌بندی مواد غذایی است. به دلیل موانعی همچون استانداردها و مقررات مرتبط با تولید مواد غذایی و نیز حساسیت مصرف کننده نسبت به تولید مواد غذایی جدید با استفاده از فناوری نانو، می‌توان انتظار داشت که بیشتر کاربرد نانوتکنولوژی در بخش استفاده غیرمستقیم قرار گیرد. در استفاده غیرمستقیم هیچ نانوماده‌ای به‌طور

۱- کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲- استادیار، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
* - نویسنده مسئول: Email: shekarchizadeh@iut.ac.ir
DOI: 10.22067/IFSTRJ.2021.72273.1089

مستقیم در ماتریکس غذایی وجود ندارد (Rajaei, 2017; Radbeh, 2017).

در یک دهه اخیر روش های نانوتکنولوژی برای بهبود ویژگی‌های عملکردی مواد بسته‌بندی به‌کار رفته‌اند. تمرکز اصلی بر روی ایجاد مواد بسته‌بندی جدیدی است که عمر مواد غذایی را افزایش می‌دهند که این ناشی از بهبود عملکرد محافظتی از غذا است (Ramehran, 2014). به‌عنوان مثال، وجود تک لایه‌های نفوذناپذیر نانومقیاس در یک ترکیب که پس از یک تغییر شیمیایی به‌دست می‌آید می‌تواند تبادل گاز (اکسیژن، نیتروژن، کربن دی‌اکسید و غیره) با محیط را کاهش دهد. در کنار بهبود عملکرد محافظت از ماده بسته‌بندی شده، استفاده از نانوساختارها می‌تواند ویژگی‌های مکانیکی بسته‌بندی را نیز بهبود دهد. نانوکامپوزیت‌های تشکیل شده از پلیمرهای زیستی توانسته‌اند جایگزین مواد مرسوم برای بسته‌بندی شوند. استفاده از نانوکامپوزیت‌های زیستی برای بسته‌بندی مواد غذایی نه تنها از مواد غذایی محافظت می‌کند و عمر مفید آنها را افزایش می‌دهد بلکه می‌تواند یک راه حل سازگار با محیط زیست در نظر گرفته شود. بسیاری از بسته‌بندی‌های سنتی از مواد غیرقابل تجزیه ساخته شده‌اند که آلودگی محیط زیست را علاوه بر مصرف سوخت‌های فسیلی برای تولید آنها دو چندان می‌کند. استفاده از نانوکامپوزیت‌های زیستی تا حد زیادی نیاز به استفاده از پلاستیک‌ها به‌عنوان مواد بسته‌بندی را کاهش می‌دهد و به پاک‌سازی و بهسازی محیط زیست کمک می‌کند. با این حال، مواد زیست تخریب‌پذیر خواص مکانیکی و ممانعتی ضعیفی دارند که بایستی قبل از آن که جایگزین پلاستیک‌های سنتی شوند، خواص آنها به‌طور قابل توجهی بهبود یابند (Rahimi et al. 2013، Diaz-Visurraga et al., 2010، Li et al., 2014).

گیاه جاوشیر از جمله گیاهان دارویی از راسته Umbellales با نام علمی *Prangos Ferulacea (*L.*) Lindl* است که بومی نواحی جنوبی ایران بوده و در زبان فارسی به نام جاوشیر و در طب سنتی استان آذربایجان غربی با نام محلی سیابو و به‌عنوان دارویی کاهنده قند خون شناخته می‌شود. از ریشه گیاه در ناحیه یقه با تیغ زدن و خراش و شکاف، شیره‌ای خارج می‌شود که به تدریج در مقابل هوا سفت می‌شود. البته از ساقه گیاه نیز صمغ گرفته می‌شود ولی کیفیت صمغ ریشه بالاتر است. این شیره در واقع صمغ گیاه است که رنگ سطح خارجی آن قرمز تیره است و سطح داخلی آن سفید است. طعم آن تند است و زبان را می‌گزد و بوی نامطبوعی دارد. صمغ ترشح شده از گیاه جاوشیر نوعی صمغ–رزین است که دارای ۶۳/۵ درصد رزین، ۲۷ درصد صمغ و ۹/۵ درصد اسانس است که در طب سنتی در درمان بسیاری از اختلالات مورد استفاده بوده است. این گونه در دامنه‌های البرز و در نواحی جنوبی ایران می‌روید. همچنین جاوشیر در استان کهگیلویه و بویراحمد در کوه دنا به وفور یافت می‌شود. در استان اصفهان نیز شهر فریدون شهر که از سردترین نقاط این استان کویری است، منبع جاوشیر است (Kheradkhord, 2018).

رزین ترکیبی طبیعی یا مصنوعی است که بسیار چسبناک است و تحت شرایطی سخت می‌شود. معمولاً در الکل قابل حل است اما در آب حل نمی‌شود. این ترکیب به طرق گوناگون طبقه‌بندی می‌شود که بستگی به ترکیب شیمیایی و مورد مصرف آن دارد. همچنین کاربردهای زیادی در هنر، تولید پلیمر و غیره دارد (A-Munshi et al., 2008). رزین طبیعی از گیاهان به‌دست می‌آید. این ماده بسیار چسبنده است ولی در اثر گذشت زمان سفت می‌شود. رنگ رزین گیاهی از شفاف تا قهوه‌ای تیره متغیر است و میزان سختی و کدورت آن متفاوت است. به دلیل نگرانی‌های زیست محیطی و امکان پایان ذخایر نفتی، ساخت کامپوزیت‌های بر پایه رزین‌های طبیعی از منابع قابل تجدید، اهمیت یافته است (Hattenhauer et al., 2016, Jada, 1998, Kubik et al., 2005).

در مطالعه‌ای که توسط Salarbashi و همکاران (۲۰۱۶) انجام گرفت، خصوصیات فیزیکوشیمیایی و میکروبی فیلم‌های حاوی نانوذرات اکسید تیتانیوم بر پایه پلی‌ساکارید آرد سویا بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت نانوذرات در فیلم‌ها، میزان رطوبت و حلالیت آنها به‌طور معنی‌داری کاهش یافت اما میزان مقاومت کششی آنها به‌طور معنی‌داری افزایش یافت (Salarbashi et al. 2016). در مطالعه دیگر توسط Zhang و Kawakami (۲۰۱۰) آماده‌سازی یک مرحله‌ای نانوذرات کیتوزان با روش الکترواسپری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی محلول و پارامترهای گرانروی و هدایت الکتریکی محلول، با کاهش غلظت استیک اسید، غلظت کیتوزان و یا میزان جریان می‌توان ذرات کوچکتر را به‌دست آورد (Zhang and Kawakami, 2010). در مطالعه‌ای دیگر توسط Liu و همکاران (۲۰۱۸) ساخت فیلم ترکیبی PVA–کیتوزان ضدباکتری با استفاده از روش الکترواسپری برای کاربردهای بسته‌بندی مواد غذایی بررسی شد. نتایج نشان دادکه در مقایسه با فیلم PVA خالص، فیلم CS –PVA افزایش طول بیشتر در هنگام شکست، نفوذپذیری به اکسیژن کم، نفوذپذیری به بخار آب کمتر و فعالیت ضدباکتری بیشتر نشان دادند (Liu et al., 2018).

امروزه به دلیل مشکلات زیست محیطی مواد سنتزی، استفاده از منابع طبیعی و ریست تخریب‌پذیر به‌عنوان مواد بسته‌بندی غذایی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور استفاده از منابع بومی از بعد اقتصادی اهمیت ویژه‌ای یافته است. لازمه رسیدن به این هدف، انجام مطالعات گسترده بر روی منابع بومی است تا بتوان بر اساس نتایج مطالعات، منابع مناسب برای این هدف را یافته و سپس برنامه‌ریزی

هایی در سطح کلان برای کشت گسترده آن منابع انجام داد. علی‌رغم اینکه جاوشیر گیاهی بومی ایران است و امکان کشت آن در مناطق گسترده‌ای از کشور وجود دارد ولی استفاده از آن به‌عنوان گیاهی دارویی محدود شده است و لذا فقط از منابع خودروی این گیاه برای مصارف دارویی در طب سنتی استفاده می‌شود و هیچ برنامه‌ای برای کشت آن در سطح وسیع وجود ندارد که دلیل آن را به عدم شناخت دقیق کلیه ویژگی‌های این گیاه می‌توان نسبت داد. در بررسی‌های قبلی از صمغ جاوشیر برای تهیه فیلم خوراکی استفاده شده است که فیلم حاصل ضمن داشتن نفوذپذیری به بخار آب و حلالیت بالا، خواص فیزیکی ضعیفی نیز داشته است (Rajaei and Shekarchizadeh, 2019). از آنجایی‌که صمغ جاوشیر، صمغی طبیعی، بومی و ارزان قیمت می باشد و امکان کشت گسترده آن در مناطق مختلف کشور وجود دارد، لذا در این تحقیق بهبود خواص فیلم تهیه شده از صمغ جاوشیر با استفاده از نانوذرات و رزین حاصل از صمغ جاوشیر مد نظر می‌باشد.

مواد و روش‌ها

استخراج صمغ و رزین جاوشیر

صمغ جاوشیر نوعی صمغ–رزین است، لذا ابتدا باید جداسازی انجام شود. در مرحله استخراج الکلی برای جداسازی صمغ و رزین، ابتدا صمغ های ناخالص آسیاب شده و سپس با ۳۰ برابر اتانول ۹۶ درصد به مدت هفت ساعت در دستگاه سوکسله رفلاکس داده شد. پس از این زمان الکل مورد استفاده که رزین را درون خود حل کرده بود را جدا کرده و درون ظرف درب بسته نگهداری شد. سپس مواد جامد باقی مانده از رفلاکس با الکل در دمای اتاق خشک شد که پودر سفید رنگی به‌دست آمد. در مرحله استخراج آبی، محلول پنج درصد از پودر سفید رنگ در آب دیونیزه تهیه شد و این محلول به مدت چهار ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد روی همزن مغناطیسی قرار داده شد. سپس محلول به‌دست آمده به مدت ۲۰ دقیقه در g ۱۰۰۰۰ سانتریفوژ (Z3HK، Hermel، آلمان) شد و محلول رویی موجود در فالکون‌ها روی یک کاغذ صافی با منافذ ریز صاف شد. محلول حاصل به مدت ۲۴ ساعت در آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. در نهایت صمغ خالص خشک شده درون ظرف درب بسته در یخچال نگهداری شد (Rajaei, 2017؛ Lin et al., 2019).

تهیه و ارزیابی نانوذرات صمغ جاوشیر

ابتدا محلول ۲۰ درصد وزنی– حجمی صمغ جاوشیر در استیک اسید ۵۰ درصد ساخته شد و تحت فرآیند الکتروپاشش (دستگاه الکتروریسی با ولتاژ بالا، ایران) موجود در آزمایشگاه پژوهشی گروه صنایع غذایی دانشگاه صنعتی اصفهان با ولتاژ ۲۰ کیلوولت و با فاصله نوک سوزن تا غلتک ۱۰ سانتی‌متر تولید شد. نانوذرات تهیه شده از روی غلتک جمع‌آوری شد و به‌منظور بررسی شکل و اندازه ذرات آنها، نانوذرات حاصل با روکش طلا پوشانیده شدند و تصاویر آنها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (XL30، Philips، هلند) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان با بزرگنمایی‌های مختلف تهیه شدند و در نهایت توسط نرم‌افزار image J متوسط قطر ذرات ارزیابی شد (Wen et al., 2016).

تهیه فیلم جاوشیر

برای تهیه فیلم جاوشیر ابتدا محلول حاوی ۲/۵ درصد صمغ استخراج شده و ۱/۳ درصد گلیسرول در آب دیونیزه تهیه شد. سپس از یک پارچه نازک به‌منظور حذف حباب‌های هوا عبور داده و به صورت یک لایه یکنواخت درون پلیت شیشه‌ای روکش داده شده با تفلون ریخته شد و به‌منظور خشک شدن به مدت ۴۴ ساعت درون آون با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. در ادامه برای پاشش نانوذرات صمغ جاوشیر بر سطح فیلم‌ها، فیلم‌های تهیه شده روی فویل‌های آلومینیومی و بر روی غلتک دستگاه الکتروپاشش گذاشته شدند و محلول صمغ جاوشیر با استفاده از دستگاه الکتروپاشش به مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه روی آنها الکتروپاشی شد. به‌منظور تعیین میزان نانوذرات اضافه شده به فیلم‌ها، وزن فیلم قبل و بعد از الکتروپاشش با استفاده از ترازوی آزمایشگاهی با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد. فیلمهایی که در معرض پاشش نانوذرات به مدت ۳۰ و ۶۰ دقیقه بودند به‌ترتیب حاوی ۰/۰۴۴ و ۰/۰۹۱ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع نانوذرات صمغ جاوشیر بودند. در ادامه به‌منظور پوشش‌دهی سطح فیلم‌ها با رزین، از محلول اتانولی مرحله استخراج صمغ که حاوی رزین تغلیظ شده (۴/۷ درصد) بود استفاده شد و به میزان ۱۶/۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع بر روی سطح فیلم ریخته و به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۳۵ درجه سانتی گراد خشک شد و برای آزمایشات بعدی مورد استفاده قرار گرفت. فیلم جاوشیر حاوی رزین تحت عنوان فیلم رزین و فیلم‌های حاوی نانوذرات و رزین تحت عنوان فیلم نانو ۳۰+ رزین و فیلم نانو ۶۰+ رزین نامگذاری شدند.

ارزیابی فیلم های تهیه شده

ضخامت

ضخامت فیلم‌ها با استفاده از میکرومتر دیجیتال دستی با دقت ۰/۰۰۱ میلی‌متراندازه‌گیری شدند. این اندازه‌گیری‌ها حداقل در چهار موقعیت مکانی فیلم به‌طور تصادفی صورت پذیرفت.

حلالیت در آب (WS)

نمونه‌های فیلم ($۴\times۴\ cm^2$) برش داده شدند و درون آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند و سپس بلافاصله سرد شدند و به‌وسیله ترازو وزن شدند (W_0). نمونه‌ها در مدت زمان ۳ دقیقه درون آب مقطر قرار داده شدند. تکه‌های فیلم حل نشده در آب جدا شدند و در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و وزن شدند (W_f). حلالیت به‌وسیله فرمول زیر تعیین شد:

$$WS\ \% = ((W_0 - W_f) / W_0) \times 100 \quad (۱)$$

نفوذپذیری به بخار آب

آزمون اندازه‌گیری نفوذپذیری با استفاده از روش اصلاح شده شماره E96 مصوب ASTM انجام گرفت (Mighan and Mohammadi Nafchi, 2017). برای این آزمایش درون ظروف شیشه‌ای با ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر به قطر ۲ سانتی‌متر سه گرم کلسیم کلرید خشک که رطوبت نسبی معادل صفر ایجاد می‌کند وزن شد. روی درپوش این ظروف منفذی به قطر ۸ میلی‌متر قرار دارد که قطعه‌ای از فیلم مورد نظر در روی این منفذ قرار گرفت. ظروف شیشه‌ای همراه با محتویات آن توزین شد و درون دسیکاتور حاوی آب مقطر قرار گرفت. آب مقطر در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد ایجاد می‌کند. دسیکاتور حاوی ظرف نمونه در دمای محیط به مدت۷۲ ساعت قرار داده شد. در این مدت هر ۲۴ ساعت یک بار در ساعت معین تغییر وزن ظروف با استفاده از یک ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۰۰۱ ثبت و نمودار آن به صورت تابعی از زمان رسم شد. منحنی افزایش وزن ظرف ها با گذشت زمان رسم و شیب خط آن به‌دست آمد. از تقسیم شیب خط مربوط به هر ظرف به سطح کل فیلم که در معرض انتقال بخار قرار دارد، سرعت انتقال بخار آب (WVTR) محاسبه و سپس با استفاده از معادله زیر نفوذ پذیری نسبت به بخار آب (WVP) محاسبه شد (Qazanfarzadeh et al., 2021):

$$WVP = \frac{WVTR}{P\ (R1 - R2)} \times X \quad (۲)$$

در این معادله X ضخامت فیلم، P فشار بخار آب خالص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد، R_1 رطوبت نسبی در دسیکاتور (۱۰۰ درصد) و R_2 درصد رطوبت نسبی در داخل ظرف شیشه‌ای است.

تست کشش

ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های فیلم از طریق آزمون‌های کششی با استفاده از دستگاه بافت‌سنج بر اساس دستورالعمل روش استاندارد ASTM D882 تعیین شد. برای این آزمون، فیلم‌ها در ابعاد مستطیلی $۶\times۱cm^2$ برش داده شد و ضخامت آن‌ها در سه نقطه مختلف اندازه گیری و میانگین آن‌ها در محاسبات استفاده شد. نمونه‌ها در فک مخصوص دستگاه اینستران قرار گرفت و فک بالایی با سرعت ۵۰ mm/min به سمت بالا حرکت کرد. از طریق فرمول‌های زیر استحکام کششی و درصد کشیدگی در نقطه شکست محاسبه گردید:

(۳) (عرض× ضخامت/ بیشینه نیروی وارد شده برحسب نیوتن) = استحکام کششی

(۴) ۱۰۰ × (طول اولیه/ تغییر طول) = درصد کشیدگی در نقطه شکست

زاویه تماس

میزان آبگریزی فیلم با استفاده از روشی که در آن زاویه تماس قطره آب با سطح نمونه اندازه‌گیری می شود، تعیین شد. قطره‌های آب ۵ میکرولیتری به‌صورت تصادفی روی ۷ نقطه از سطح فیلم قرار داده شدند و میانگین آن ها به‌عنوان زاویه تماس استاتیک گزارش شد (Qazanfarzadeh et al., 2021).

بررسی ریز ساختار فیلم تولید شده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی

برای تهیه تصاویر میکروسکوپی از سطح فیلم‌ها، آنها با کمک چسب دو طرفه بر روی پایه آلومینیومی چسبانده شدند. در آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری از مقطع عرضی ابتدا نمونه‌ها در ازت مایع شکسته شدند و سپس از سمت مقابل قسمت شکسته شده به کمک چسب دو طرفه بر روی پایه آلومینیومی چسبانده شدند. پایه‌ها در یک دستگاه پوشش‌دهنده به مدت ۵ دقیقه با طلا پوشش داده شدند. تصویربرداری از نمونه‌ها به‌وسیله یک میکروسکوپ الکترونی (XL30، Philips، هلند) موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی اصفهان در بزرگنمایی‌های مختلف انجام گرفت.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

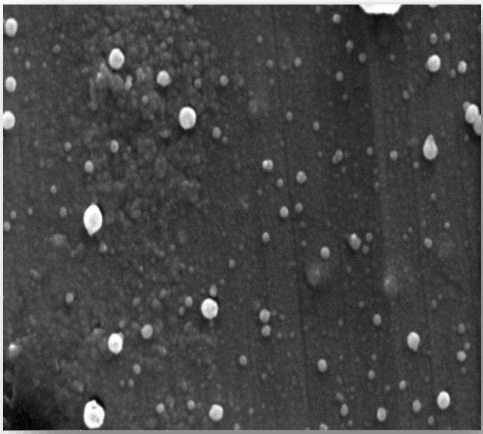
اندازه‌گیری‌ها حداقل در سه تکرار انجام شد. برای آنالیز آماری نمونه‌ها از روش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی استفاده شد. آزمون مقایسه میانگین داده‌ها به روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام شد.

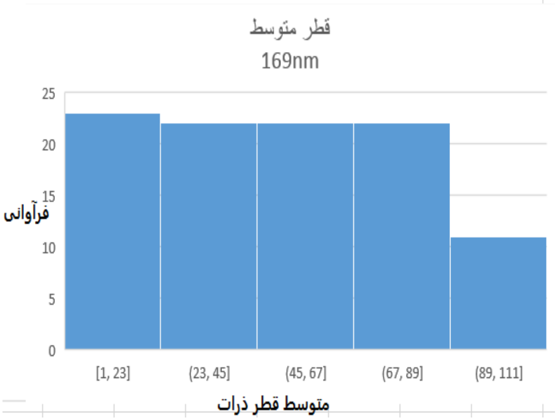
نتایج و بحث

ارزیابی نانوذرات صمغ جاوشیر با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی مربوط به نانوذرات تولید شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱ سمت چپ منحنی توزیع اندازه ذرات

مربوط به نانوذرات تولید شده نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ذرات تولید شده کروی شکل و در ابعاد نانو هستند. فرورفتگی‌های قابل مشاهده در سطح ذرات به دلیل خروج سریع حلال طی الکتروپاشش است. متوسط قطر ذرات تولید شده ۳۱/۸۱ ±۱۶۹ نانومتر محاسبه شد.





شکل ۱- تصویر SEM نانوذرات با بزرگنمایی ۱۲۰۰۰۰ x (راست) و توزیع قطر نانوذرات با استفاده از ImageJ (چپ) صمغ جاوشیر

Fig. 1. SEM image of nanoparticles at 12000 x (right) and distribution of nanoparticles diameter using ImageJ (left) of opopanax gum

ارزیابی فیلم‌های تهیه شده

ضخامت

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رزین جاوشیر در پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر اثر معنی‌داری بر ضخامت فیلم‌ها داشته است (P<۰/۰۵). این در حالی است که استفاده از نانوذرات صمغ جاوشیر تاثیر معنی‌داری بر ضخامت فیلم‌ها نداشته است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر و فیلم پوشش‌دهی شده با رزین جاوشیر سبب افزایش معنی‌دار ضخامت فیلم‌ها نشده است.

جدول ۱- ضخامت فیلم های مختلف

Table 1- Thickness of different films

ضخامت (میلی‌متر) Thickness (mm)	تیمار Treatment
0.383± 0.054 ^{b}	فیلم شاهد (Control film)
0.381± 0.028 ^{b}	فیلم نانو۳۰ (Nano 30 film)
0.433± 0.048^{a}	فیلم نانو٦۰ (Nano 60 film)
0.421± 0.040 ^{a}	فیلم رزین (Resin film)
0.411± 0.034 ^{ab}	فیلم نانو۳۰+ رزین (Nano 30+ resin film)
0.402± 0.035 ^{ab}	فیلم نانو٦۰+ رزین (Nano 60+ resin film)

-حروف مختلف نشان دهنده معنی داری است (p < ۰/۰۵)

Different letters indicate significant differences (p<0.05).

پس از پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با رزین آن، ضخامت فیلم به‌طور معنی‌داری افزایش یافته است. مساله‌ای که باید به آن دقت کرد این است که ضخامت فیلم شاهد و فیلم‌های حاوی نانوذرات که پوشش رزینی نداشته‌اند در مقایسه با فیلم‌های حاوی نانوذرات و پوشش رزینی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند. این در حالی است که پوشش رزینی به تنهایی باعث افزایش ضخامت فیلم جاوشیر شده است. دلیل آن را می‌توان به جذب آب بالای صمغ جاوشیر نسبت داد. جذب آب بالای فیلم جاوشیر در مطالعه Rajaei (2017) مورد تایید قرار گرفته است. ضخامت فیلم جاوشیر در اثر جذب رطوبت محیط به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و افزودن مقدار زیادی نانوذرات جاوشیر به فیلم،

این مسئله را تشدید می‌کند به‌گونه‌ای که فیلم نانو ۶۰ ضخامتی شبیه فیلم رزین پیدا کرده است. به‌نظر می‌رسد در مقادیر بالای نانوذرات، تجمع ذرات رخ می‌دهد که این امر منجر به بالا رفتن اندازه ذرات می‌شود و در نتیجه تغییرات ناشی از وارد شدن به ابعاد نانو کاهش می‌یابد و رفتار ذرات شبیه پلیمر اولیه می‌شود. وجود مقدار زیاد نانوذرات در فیلم نانو۶۰ باعث افزایش جذب رطوبت محیط توسط این فیلمها می‌شود. پوشش‌دهی سطح فیلم‌ها با رزین شدت جذب رطوبت توسط نانوذرات را کاهش داده که به دلیل ماهیت آبگریز رزین می‌باشد و این سبب شده در فیلم‌های نانو ۳۰+ رزین و نانو ۶۰+ رزین افزایش ضخامت نسبت به فیلم رزین ایجاد نشود. در مطالعه Nafchi و Mirzari (۲۰۱۵) اثر نانواکسید روی بر خواص فیلم‌های زیست کامپوزیتی بر پایه ژلاتین ماهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آنها نشان داد که ضخامت کلی فیلم‌های نانوکامپوزیتی به‌دست آمده با اضافه کردن نانوذرات، بدون تغییر باقی مانده بود (Nafchi and Mirzari, 2015).

حلالیت در آب

حلالیت در آب یک فاکتور مهم در تعریف کاربردهای ممکن برای فیلم‌های پلیمری خوراکی است. بیشتر پلیمرهای طبیعی به رطوبت حساس و محلول در آب هستند که می‌توان با روش‌های مختلف مانند گنجاندن ترکیبات چربی با منشا خوراکی در فیلم‌ها، استفاده از نانوذرات و یا با ایجاد پیوندهای عرضی حلالیت را کاهش داد. انحلال‌پذیری پایین آب ویژگی مطلوبی برای بسته‌بندی مواد غذایی است، زیرا فیلم‌های بسته‌بندی با چنین ویژگی‌هایی می‌توانند در برابر شرایط با رطوبت بالا مقاوم باشند. جدول ۲ حلالیت در آب فیلم‌های مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که فیلم جاوشیر بیشترین حلالیت در آب را دارد. انحلال‌پذیری فیلم‌ها در آب با افزودن نانوذرات کاهش یافته است. پوشش‌دهی سطح فیلم‌ها با رزین نیز کاهش حلالیت را به همراه داشته است. فیلم شاهد به علت آبدوست بودن، حلالیت در آب بالایی دارد. حلالیت بالای این فیلم‌ها به حضور گروه‌های هیدروکسیل و وجود نرم‌کننده هیدروفیل (گلیسرول) نسبت داده می‌شود. کاهش حلالیت با اضافه کردن نانو ذرات صمغ جاوشیر را می‌توان به تشکیل پیوندهای هیدروژنی قوی بین پلیمر جاوشیر و ذرات نانو که باعث استحکام بیشتر فیلم می‌گردد، نسبت داد. همچنین کاهش حلالیت در اثر پوشش‌دهی با رزین را به ماهیت آبگریز این ماده می‌توان نسبت داد. در تحقیقی که توسط Ghazihoseini و همکاران (۲۰۱۵) انجام شد دریافتند که با افزایش محتوی نانورس به فیلم‌های پروتئین محلول در آب سویا، حلالیت در آب به دلیل شکل‌گیری پیوندهای هیدروژنی قوی بین ماتریکس پروتئین سویا و نانوذرات کاهش پیدا می‌کند (Ghazihoseini et al., 2015).

جدول ۲- حلالیت در آب فیلم های مختلف

Table 2- Water solubility of different films.

تیمار Treatment	حلالیت در آب (٪) Water solubility (%)
فیلم شاهد (Control film)	85.84
فیلم نانو۳۰ (Nano 30 film)	76
فیلم نانو٦۰ (Nano 60 film)	70.84
فیلم رزین (Resin film)	40
فیلم نانو۳۰+ رزین (Nano 30+ resin film)	32.5
فیلم نانو٦۰+ رزین (Nano 60+ resin film)	17.67

نفوذپذیری به بخار آب

میزان نفوذپذیری به بخار آب در فیلم‌های خوراکی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مورد بررسی می‌باشد. از آنجایی که فیلم حاصل از صمغ جاوشیر نفوذپذیری به بخار آب بالایی دارد، ممانعت یا به حداقل رساندن انتقال رطوبت بین اتمسفر محیط و ماده غذایی یکی از هدف های این پژوهش بود. به همین دلیل از نانو ذرات جاوشیر و رزین جاوشیر استفاده شد. نتایج نشان داد که پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با رزین و استفاده همزمان نانوذرات و رزین سبب تغییر معنی‌دار نفوذپذیری به بخار آب فیلم جاوشیر شده است (P<۰/۰۵). این در حالی است که افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر به تنهایی تاثیر معنی‌داری بر نفوذپذیری به بخار آب فیلم جاوشیر نداشته است. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که چنانچه نانوذرات در مقادیر کم به فیلم جاوشیر افزوده شود تاثیر معنی‌داری بر نفوذپذیری به بخار آب فیلم ندارد به‌طوری که فیلم شاهد و فیلم نانو ۳۰ اختلاف معنی‌داری از نظر نفوذپذیری به بخار آب نداشتند. این در حالی است که مقادیر بالای نانوذرات جاوشیر به دلیل بالا بردن ماهیت آبدوست فیلم نانو ۶۰، نفوذپذیری به بخار آب را به طور معنی‌داری افزایش داده است. پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با لایه رزین به‌طور معنی‌داری نفوذپذیری به بخار آب فیلم را کاهش داده

است به‌گونه‌ای که کمترین میزان نفوذپذیری مربوط به فیلم رزین است که به ماهیت آبگریز این ترکیب مربوط می‌شود. پوشش رزین در فیلم نانو ۶۰+ رزین توانسته اثر مخرب نانوذرات در نفوذپذیری به بخار آب را کاهش دهد به‌گونه‌ای که نفوذپذیری به بخار آب آن با فیلم شاهد اختلاف معنی‌داری ندارد. Hashemi و همکاران (۲۰۱۸) نشان داد که برهمکنش همزمان نانوذرات رس و کیتوزان باعث کاهش نفوذ پذیری به بخار آب شده و ذرات نانو به تنهایی اثر معنی داری نداشت (Hashemi et al., 2018).

جدول ۳- نفوذ پذیری به بخار آب فیلم های مختلف

Table 3- Water vapor permeability of different films

تیمار Treatment	نفوذ پذیری به بخار آب ($\times 10^{-9}$ g m/ Pa s m^2) WVP ($\times 10^{-9}$ g m/ Pa s m^2)
فیلم شاهد (Control film)	2.33±0.29 ^{b}
فیلم نانو۳۰ (Nano 30 film)	1.97±0.80 ^{b}
فیلم نانو٦۰ (Nano 60 film)	3.03±0.23 ^{a}
فیلم رزین (Resin film)	1.24±0.82 ^{c}
فیلم نانو۳۰+ رزین (Nano 30+ resin film)	2.47±0.76 ^{ab}
فیلم نانو٦۰+ رزین (Nano 60+ resin film)	2.06±0.67 ^{b}

–حروف مختلف نشان دهنده معنی داری است ($p < ۰/۰۵$)

Different letters indicate significant differences ($p<0.05$).

آزمون بافت‌سنجی

از جمله خصوصیات مهم فیلم‌های زیست تخریب‌پذیر مقاومت کششی (TS) و کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن (EAB) است. مقاومت کششی، حداکثر کششی است که فیلم تحمل می‌کند تا پاره شود و کشیدگی یا افزایش طول در نقطه شکست، درصد افزایش طول نمونه در زمان پاره شدن است. کشش‌پذیری بالای فیلم، همیشه یک مشخصه مطلوب است که با درصد بالای افزایش طول در زمان پاره شدن، مشخص می‌شود (Parris et al., 1995).

افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر و فیلم حاوی پوشش رزینی اثر معنی‌داری بر کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن فیلم جاوشیر داشته است (P<۰/۰۵). این در حالی است که پوشش‌دهی سطح فیلم با رزین به تنهایی تاثیر معنی‌داری بر این پارامتر نداشته است. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که بیشترین کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن مربوط به فیلم شاهد است. بالا بودن کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن در فیلم شاهد به ماهیت پلیمر جاوشیر و وجود مقدار قابل توجه گلیسرول در فیلم شاهد نسبت داده شده است (Rajaei, 2017). افزودن نانوذرات جاوشیر به فیلم جاوشیر سبب شده که کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن به شدت کاهش یابد. حضور نانوذرات به‌خودی خود سبب کاهش کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن می‌شود و مقدار نانوذرات اثر معنی‌داری بر این کاهش ندارد. کاهش کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن در اثر حضور نانوذرات در فیلم‌ها به برهمکنش نانوذرات با رنجیرهای پلیمری جاوشیر از طریق برهمکنش‌های بین مولکولی مانند پیوندهای هیدروژنی و در نتیجه کاهش تحرک زنجیره پلیمری نسبت داده می‌شود. پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با لایه رزین سبب کاهش عددی کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن فیلم حاصل نسبت به فیلم شاهد شده است ولی این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نشده است. جالب توجه است که در فیلم‌های نانو ۳۰ + رزین و نانو۶۰+ رزین که نانوذرات و رزین به‌طور همزمان وجود دارند، اثر نانوذرات غالب بوده و کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن این فیلم ها کاهش قابل توجهی یافته است.

افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر و فیلم پوشش‌دهی شده با رزین، باعث تغییر معنی‌دار مقاومت کششی فیلم شده است (P<۰/۰۵). نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که فیلم شاهد مقاومت کششی بسیار پایینی دارد. استحکام کششی بسیار پایین فیلم جاوشیر را به ماهیت مولکولی و حضور گلسیرول بالا در این فیلم ها نسبت داده‌اند (Rajaei, 2017). افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر باعث افزایش معنی‌دار مقاومت کششی فیلم حاصل شده است. البته شبیه نتایج کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن مقدار نانوذره اضافه شده تاثیر معنی‌داری بر افزایش مقاومت کششی فیلم حاصل نداشته است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با لایه رزینی نتوانسته باعث تغییر معنی‌دار مقاومت کششی فیلم شاهد شود. اگر چه مقاومت کششی فیلم رزین از نظر عددی کاهش یافته است و کمترین میزان را در بین فیلم‌های حاصل دارد. نکته جالب توجه این است که افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر و سپس پوشش‌دهی آن با رزین جاوشیر به شدت باعث افزایش مقاومت کششی فیلم جاوشیر شده است و در اینجا مقدار نانوذرات مصرفی بر نتایج مقاومت کششی تاثیر معنی‌دار داشته است به‌گونه‌ای که فیلم نانو ۳۰ +رزین و بعد از آن فیلم نانو ۶۰ +رزین بالاترین مقاومت کششی را

در میان فیلم‌های تهیه شده دارند. افزایش مقاومت کششی فیلم‌های حاوی نانوذرات به برقراری برهمکنش بین نانوذرات و زنجیرهای پلیمری نسبت داده می‌شود. در واقع افزودن نانوذرات به فیلم‌ها موجب می‌شود تا تنش به‌طور یکنواخت در فیلم توزیع شده و از این‌رو خصوصیات مکانیکی فیلم‌ها بهبود می‌یابند.

Yixiang و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقی پیرامون خصوصیات فیلم نانوکامپوزیت کیتوزان/ نانورس مونتموریلونیت گزارش نمودند که با افزودن نانورس تا کمتر از ۵ درصد، استحکام کششی فیلم نانوکامپوزیت افزایش یافته و توزیع نانورس در ماتریکس کیتوزان به‌صورت ساختار ورقه‌ای بوده که سازگاری مناسب و بالای بیوپلیمر و نانو رس را نشان می‌دهد (Yixiang et al., 2006).

جدول ٤- کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن فیلم‌های مختلف
Table 4- Elongation at break of different films

کشش پذیری تا نقطه پاره شدن(%) Elongation at break (%)	تیمار Treatment
284.16± 174.63 [a]	فیلم شاهد (Control film)
82.45± 30.66 [b]	فیلم نانو۳۰ (Nano 30 film)
75.09± 31.01 [b]	فیلم نانو٦۰ (Nano 60 film)
228.24± 12.71 [a]	فیلم رزین (Resin film)
60.53± 2.72 [b]	فیلم نانو۳۰+رزین (Nano 30+ resin film)
80.17± 7.10 [b]	فیلم نانو٦۰+رزین (Nano 60+ resin film)

-حروف مختلف نشان‌دهنده معنی‌داری است (p < ۰/۰۵)
Different letters indicate significant differences (p<0.05).

جدول ٥- مقاومت کششی فیلم های مختلف
Table 5- Tensile strength of different films

مقاومت کششی(MPa) Tensile strength (MPa)	تیمار Treatment
14.25± 2.44 [d]	فیلم شاهد (Control film)
68.22± 25.87 [c]	فیلم نانو۳۰ (Nano 30 film)
97.85± 88.30 [c]	فیلم نانو٦۰ (Nano 60 film)
0.83 ±0.72 [d]	فیلم رزین (Resin film)
302.9± 47.09 [a]	فیلم نانو۳۰+رزین (Nano 30+ resin film)
82.19± 25.42 [b]	فیلم نانو٦۰+رزین (Nano 60+ resin film)

-حروف مختلف نشان‌دهنده معنی‌داری است (p < ۰/۰۵)
Different letters indicate significant differences (p<0.05).

زاویه تماس

با توجه به اندازه زاویه تماس آبدوستی یا آبگریزی سطح جامد مشخص می‌شود. اگر زاویه تماس کمتر از ۳۰ درجه باشد، قطره آب سطح را کاملا مرطوب می‌کند و سطح آبدوست خواهد بود. اگر زاویه تماس بین ۳۰ تا ۸۹ درجه باشد، سطح به‌طور نسبی آبگریز است و اگر زاویه تماس بیش از ۹۰ درجه باشد، سطح آبگریز در نظر گرفته می‌شود. مواد مورد استفاده در بسته‌بندی باید تا حد امکان حساسیت به رطوبت کمتری داشته باشند. هرچه زاویه تماس قطره آب با فیلم بسته‌بندی بیشتر باشد، آن ماده قابلیت بیشتری برای بسته‌بندی دارا می‌باشد و بالعکس (Rajaei, 2017).

افزودن نانوذرات به فیلم جاوشیر و یا پوشش‌دهی سطح فیلم با رزین به تنهایی و یا در ترکیب با یکدیگر اثر معنی‌داری بر زاویه تماس فیلم‌ها دارند (P<۰/۰۵). با توجه به نتایج جدول ۶ می‌توان گفت که فیلم شاهد کمترین زاویه تماس یعنی بیشترین آبدوستی را در میان فیلم های تهیه شده دارد که به ماهیت پلی‌ساکاریدی این صمغ مربوط است. افزودن نانوذرات صمغ جاوشیر به شدت زاویه تماس و به عبارتی آبگریزی را افزایش داده است. افزایش آبگریزی تاییدکننده کاهش حلالیت فیلم‌ها در اثر افزودن نانوذرات به فیلم می‌باشد. اما جالب توجه است که میزان نانوذرات اضافه شده بر زاویه تماس اثر معنی‌داری داشته به‌گونه‌ای که در فیلم نانو ۶۰ که مقدار نانوذرات استفاده شده افزایش

یافته است، زاویه تماس کاهش یافته و آبگریزی آن با فیلم شاهد اختلاف معنی‌داری نداشته است. به‌نظر می‌رسد در مقادیر بالای نانوذرات، تجمع ذرات رخ می‌دهد که این امر منجر به بالا رفتن اندازه ذرات می‌شود و در نتیجه تغییرات ناشی از وارد شدن به ابعاد نانو را کاهش می‌دهد و رفتار ذرات را شبیه پلیمر اولیه می‌کند. نتایج زاویه تماس با نتایج رطوبت همخوانی دارد و در نتیجه می‌توان گفت هرچه رطوبت نمونه بیشتر باشد لذا زاویه تماس نمونه هم کمتر است (نمونه شاهد) و با کاهش رطوبت نمونه‌ها، زاویه تماس افزایش پیدا خواهد کرد.

پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با لایه رزین سبب افزایش معنی دار زاویه تماس و به عبارتی افزایش آبگریزی فیلم رزین شده است که به ماهیت آبگریز رزین مربوط است. جالب توجه این است که در فیلم جاوشیر حاوی نانوذرات پس از پوششی‌دهی با رزین، اثر نانوذرات بر زاویه تماس متفاوت می‌شود به‌گونه‌ای که مقدار کمتر نانوذرات در فیلم نانو ۳۰+ رزین تاثیر معنی‌داری بر زاویه تماس نداشته ولی میزان بالاتر ذرات سبب افزایش معنی‌دار زاویه تماس و در نتیجه افزایش آبگریزی فیلم نانو ۶۰+ رزین شده است به‌گونه‌ای که بیشترین زاویه تماس را در بین فیلم‌های مورد بررسی داشته است. به‌نظر می‌رسد نانوذرات مورد استفاده باعث افزایش سطح فیلم شده‌اند و زمانیکه رزین بر روی این سطح توسعه یافته قرار گرفته است، سطح آبگریز فیلم را به شدت افزایش داده است. Atef و همکاران (۲۰۱۵)، بعد از اضافه کردن اسانس پونه به فیلم نانوکامپوزیت مشاهده کردند که زاویه تماس به شکل معنی داری افزایش یافته است. افزایش زاویه تماس فیلم‌های فعال در قیاس با فیلم نانوکامپوزیت احتمالاً ناشی از حضور اسانس با طبیعت آبگریز است که آبگریزی سطح را افزایش داده و متعاقباً از ورود آب به داخل ساختار زیست پلیمر ممانعت کرده است (Atef et al., 2015).

جدول ٦- زاویه تماس فیلم های مختلف

Table 6- Contact angle of different films

زاویه تماس Contact angle	تیمار Treatment
12.33± 0.85 c	**فیلم شاهد (Control film)**
89.77± 9.92 b	**فیلم نانو۳۰ (Nano 30 film)**
17.16± 1.10 c	**فیلم نانو٦۰ (Nano 60 film)**
84.54± 9.15 b	**فیلم رزین (Resin film)**
90.43± 7.26 b	**فیلم نانو۳۰+ رزین (Nano 30+ resin film)**
103.07± 14.05 a	**فیلم نانو٦۰+ رزین (Nano 60+ resin film)**

–حروف مختلف نشان‌دهنده معنی‌داری است ($p < ۰/۰۵$)

Different letters indicate significant differences ($p<0.05$).

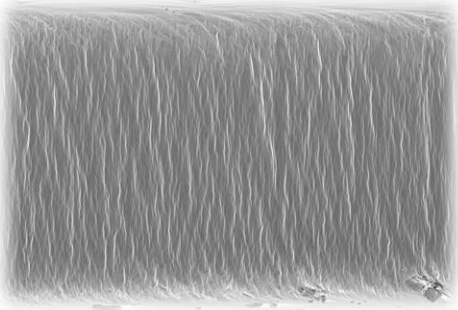
بررسی ساختار فیلم‌های تهیه شده با استفاده از SEM

شکل ۲ تصاویر SEM از مقطع عرضی و سطح فیلم‌های شاهد، نانو ۳۰، رزین و نانو ۶۰+ رزین است. زبری سطح فیلم حاصل از صمغ جاوشیر قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۲ سطحی کدر و یک دست از فیلم شاهد را نشان می‌دهند. با اضافه کردن نانوذرات به سطح، مشاهده می‌شود که برجستگی‌هایی در سطح ایجاد شده است که تاییدکننده حضور نانوذارت است. شکل ۲ به‌خوبی پوشش‌دهی سطح با رزین را تایید می‌کند. کاهش کدورت و زبری نسبت به فیلم شاهد ضمن یک دست بودن نشان‌دهنده پوشش رزین است. حضور نانوذرات در فیلم پوشش‌دهی شده با رزین کاهش شدید کدورت و زبری سطح را نشان می‌دهد. این شکل توجیهات قبلی را تایید می‌کند که با افزودن نانوذرات در مقادیر بالا، سطح به شدت افزایش می‌یابد و زمانیکه رزین بر روی این سطح گسترده قرار می‌گیرد تاثیرات سطحی چشمگیری پیدا می کند. Ghasemloo و همکاران (۲۰۱۲) تهیه و بررسی بیوفیلم بسته بندی زیست تخریب‌پذیر ضدمیکروبی بر پایه نشاسته ذرت را بررسی کردند. تصاویر عرضی و سطحی میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داد که ریزساختار فیلم‌های شاهد دارای سطوحی صاف و یکنواخت بوده و هیچ گونه خلل و فرج و ترکی در آنها مشاهده نمی‌شود. سطح رویی فیلم هیدروفوب ساختاری ناصاف داشت که نشان‌دهنده حضور اسید چرب در این قسمت بوده است (Ghasemloo et al., 2012).

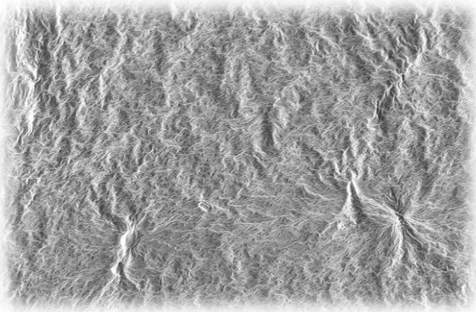
نتیجه‌گیری

نفوذپذیری به بخار آب فیلم شاهد نسبت به سایر فیلم‌های خوراکی بسیار بالا است. افزودن نانوذرات باعث افزایش نفوذپذیری به بخار آب شد ولی پوشش‌دهی با رزین کاهش این پارامتر را به همراه داشت. بیشترین کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن مربوط به فیلم شاهد است. افزودن نانوذرات جاوشیر به فیلم جاوشیر سبب شده که کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن به شدت کاهش یابد.

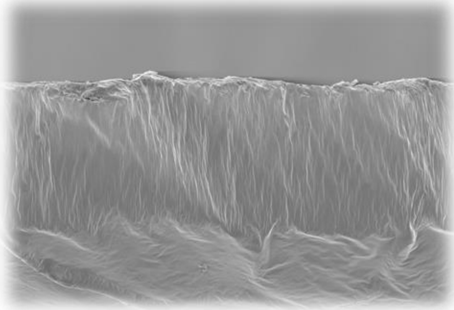
الف (A)



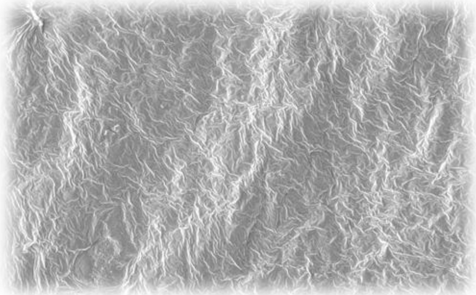
ب (B)



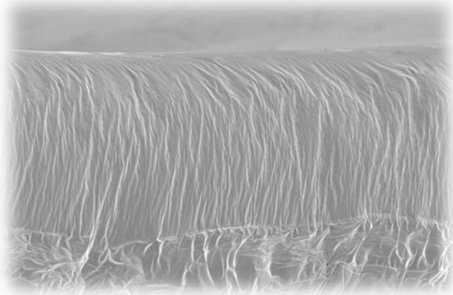
ج (C)



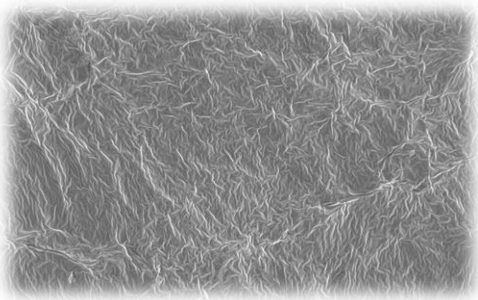
د (D)



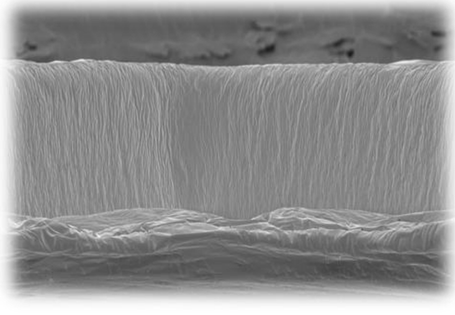
ن (E)



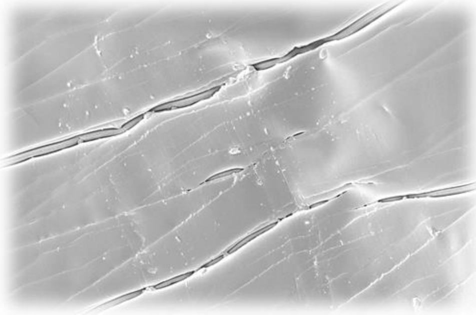
و (F)



ه (G)



ی (H)



شکل ۲- تصویر SEM فیلم شاهد (مقطع عرضی (الف) و سطح (ب))، فیلم نانو ۳۰ (مقطع عرضی (ج) و سطح (د))، فیلم رزین (مقطع عرضی (ن) و سطح (و)) و فیلم نانو ٦٠ + رزین (مقطع عرضی (ه) و سطح (ی)) با بزرگنمایی 1000 x.

Fig. 2. SEM images of control film (cross section (A) and surface (B)), nano 30 film (cross section (C) and surface (D)), resin film (cross section (E) and surface (F)) and nano 60 + resin film (cross section (G) and surface (H)) at 1000 x.

پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با لایه رزین سبب کاهش عددی کشش‌پذیری تا نقطه پاره شدن فیلم حاصل شده است ولی این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار نشده است. نتایج همچنین نشان می‌دهد که پوشش‌دهی سطح فیلم جاوشیر با لایه رزینی نتوانسته باعث تغییر معنی‌دار مقاومت کششی فیلم شاهد شود اگر چه مقاومت کششی فیلم رزین از نظر عددی کاهش یافته است و کمترین میزان را در بین فیلم‌های حاصل دارد. بر اساس نتایج به‌دست آمده از تست زاویه تماس می‌توان گفت که فیلم شاهد کمترین زاویه تماس یعنی بیشترین آبدوستی را در میان فیلم‌های تهیه شده دارد که به ماهیت پلی‌ساکاریدی این صمغ مرتبط است. افزودن نانوذرات صمغ جاوشیر و همچنین پوشش‌دهی با رزین به شدت زاویه تماس و در نتیجه آبگریزی را افزایش داده است. تصاویر SEM به‌دست آمده از فیلم‌های تهیه شده نشان داد وجود ذرات نانو به همراه رزین تا حد زیادی از زبری نمونه می‌کاهد. لذا با در نظر گرفتن مجموع عوامل مورد نظر برای یک فیلم مطلوب، می توان فیلم نانو ۳۰+ رزین را به‌عنوان بهترین فیلم انتخاب کرد. نتایج نشان داد استفاده از رزین و نانوذرات جاوشیر به‌خوبی سبب بهبود ویژگی‌های فیلم ضعیف جاوشیر می‌شود. در نهایت می‌توان گفت فیلم تهیه شده در این تحقیق به دلیل نفوذپذیری به بخار آب کم و کشش‌پذیری بالا می‌تواند برای استفاده در بسته‌بندی‌های چند لایه مواد غذایی گزینه بسیار خوبی باشد.

منابع

1. A-Munshi, A. M, Singh, V. N., Kumar, M., and Singh, J. P. (2008). Effect of nanoparticle size on sessile droplet contact angle. *J. Appl. Phys*. 103: 401-41.
2. Atef, M., Rezaei, M., and Behrooz, R. (2015). Characterization of physical, mechanical, and antibacterial properties of agar-cellulose bionanocomposite films incorporated with savory essential oil. *Food Hydrocollied*. 45: 150-157.
3. Diaz-Visurraga, J., Mele´ndrez, M.F., Garcia, A., Paulraj, M., and Cardenas, G. (2010). Semitransparen chitosan-TiO2 nanotubes composite film for food package applications. *J. Appl. Polym. Sci*. 116: 3503–3515. https://doi.org/10.1002/app.31881
4. Ghasemloo, M., Khaksar, M. and Mardani, T. (2012). Preparation and evaluation of biodegradable and antimicrobial biofilm packaging based on corn starch. *Journal of Nutritional Sciences and Food Industries of Iran*. 5: 123-115.
5. Ghazihoseini, S., Alipoormazandarani, N., and Mohammadi Nafchi, A. (2015). The Effects of Nano-SiO_2 on Mechanical, Barrier, and Moisture Sorption Isotherm Models of Novel Soluble Soybean Polysaccharide Films. *Int. J. Food Eng*. 11: 833-840.
6. Hashemi, J. (2018). The effect of combined ratio of chitosan-bentonite nano clay on mechanical properties, permeability to water vapor and microstructure of nanocomposite film. *Journal of Food Processing and Preservation*. 10: 46-33.
7. Hattenhauer, I., Radomski, F. A. D., de Araujo Duarte, C., and Mamo, M. A. (2016). Epoxy resin in organic WORM memories: From capsuling to the active layer. Org. *Electron*. 34: 57-66. https://doi.org/10.1016/j.orgel.2016.04.018
8. Jada, S. S. (1988). The structure of urea—formaldehyde resins. *J. Appl. Polym. Sci*. 35: 1573-1592. https://doi.org/10.1002/app.1988.070350614
9. Kadivar, M. and Soltanizadeh, N. (2013). An introduction to the food industry. Learned Publications, Isfahan.
10. Kheradkhord, A. (2018). Determination of the physicochemical and functional properties of opopanax gum. MSc thesis, College of Agriculture, Isfahan University of Technology. Isfahan.
11. Khezri, Z. (2018). Encapsulation of garlic essential oil in nanofibers of opopanax gum. MSc thesis, College of Agriculture, Isfahan University of Technology. Isfahan.
12. Kubik T, Bogunia-Kubik K, and Sugisaka M. (2005). Nanotechnology on duty in medical applications. *Curr. Pharm. Biotechnol*. 6: 17-33.
13. Li, J., Li, H., Zhao, Y., Hu, H., and Wang, Q. (2014). Hollow fiber taper with a silver micro-sphere used as refractive index sensor. Opt. Commun. 318: 7-10. https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.12.039
14. Lin, W., Shi, Q. Q., Chen, H., and Wang, J. N. (2019). Mechanical properties of carbon nanotube fibers reinforced epoxy resin composite films prepared by wet winding. *Carbon*. 153: 308-314. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.07.002
15. Liu, Y., Wang, S., and Lan, W. (2018). Fabrication of antibacterial chitosan-PVA blended film using electrospray technique for food packaging applications. Int. J. Biol. Macromol. 107: 848-854. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.044
16. Mighan Nasim, M. and Mohammadi Nafchi, R. (2017). Investigating the effect of nano zinc oxide on physicochemical properties and parameters of microbial growth equations of potato starch biocomposite. Islamic Azad University Publications. Shahrood 9: 96-87.
17. Nafchi, A. and Mirzaei, F. (2015). Evaluation of the effects of nano zinc oxide on the properties of biocomposite films based on fish gelatin. Islamic Azad University Publications. Shahrood 13: 57-67.

18. Parris, T., Coffin, D.R, Joubran, R.F and Pessen, H. (1995). Tensile properties of hydrophilic films. *J. Agri. Food Chem*. 43: 1432-1435. https://doi.org/10.1021/jf00054a004
19. Qazanfarzadeh, Z., Kadivar, M., Shekarchizadeh, H., Di Girolamo, R., Giosafatto, C. V. L. and Porta, R. (2021). Secalin enzymatically cross-linked by either papain and N-acetyl-DL-homocysteine thiolactone or transglutaminase: Improving of protein functional properties and film manufacturing. *Food Hydrocollied*. 120: 106912. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106912
20. Radbeh, Z. (2017). Nanotechnology and its application in the food industry. First Art publications. Tabriz.
21. Rahimi, Gh., Zamani, R., and Pol, M. (2013). Studying the effect of adding clay nanoparticles on the tensile and bending properties of epoxy resin system hardened with theta hardener. Publications of Tarbiat Modares University. Tehran. 14:34-29.
22. Rajaei, E. (2017). Using opopanax gum as a new source of edible film and investigation of its physical and mechanical properties. MSc thesis, College of Agriculture, Isfahan University of Technology. Isfahan.
23. Rajaei, E., and Shekarchizadeh, H. (2019). Investigation of the physical and mechanical properties of biodegradable film prepared from opopanax gum. *Journal of Food Scienc and Technology* (Iran). 16(91):323-335.
24. Ramehran, M. 2014. Application of edible films to increase food shelf life. Second National Conference on Application of Modern Technologies and Sciences of Agricultural, Natural Resources and Environment. Islamic Azad University of Meybod.
25. Salarbashi, D., Shahidi, M., and Shahabi, I. (2016). Investigation of the physicochemical and microbial properties of prepared films based on soybean flour polysaccharide containing titanium oxide nanoparticles. 4: 91-103.
26. Wen, P., Zhu, D. H., Wu, H., Zong, M. H., Jing, Y. R. and Han, S. Y. (2016). Encapsulation of cinnamon essential oil in electrospun nanofibrous film for active food packaging. *Food Control*. 59: 366-376. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.06.005
27. Yixiang, X., Ren, X., and Milford Hanna, A. 2006. Chitosan/clay nanocomposite film preparation and characterization. *J. Appl. Polym. Sci*. 99: 1684–1691. https://doi.org/10.1002/app.22664
28. Zhang, S., and Kawakami, K. 2010. One-step preparation of chitosan solid nanoparticles by electrospray deposition. *Int. J. Pharm.* 397: 211-217. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2010.07.007